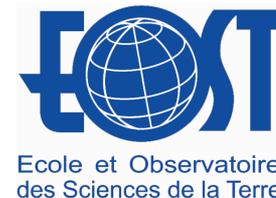
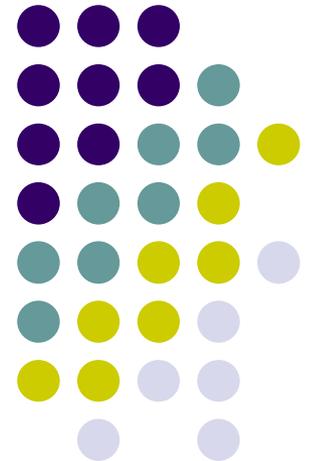


# Les couplages sismo-électromagnétiques: une nouvelle méthode de caractérisation du milieu poreux?

**Clarisse BORDES**, MIG Pau/LGIT Grenoble  
Laurence JOUNIAUX, IPG Strasbourg  
Michel DIETRICH, LGIT Grenoble



# PROBLEMATIQUE

## Observation du champ sismo-électrique sur le terrain:

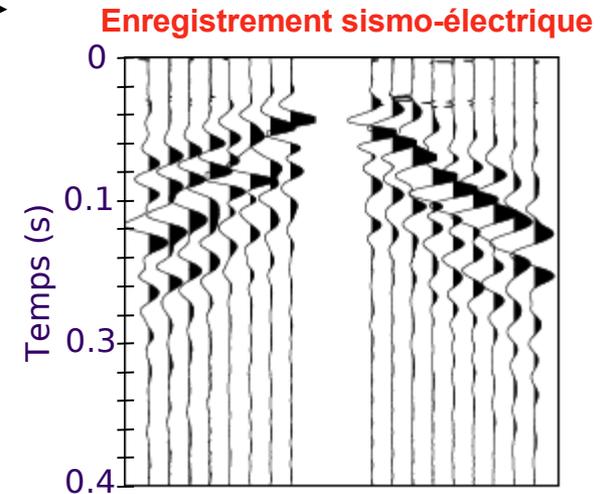
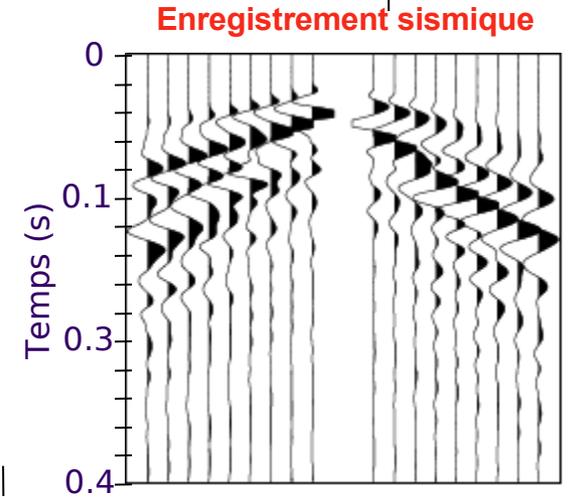
*Exemple de Vesdun en Berry*



17 géophones  
horizontaux  
+  
17 dipôles (1m)

5 m

54,5 m



**Similarités** entre champs  
Sismique et sismo-électrique

→ Caractérisation du milieu

Stack 300

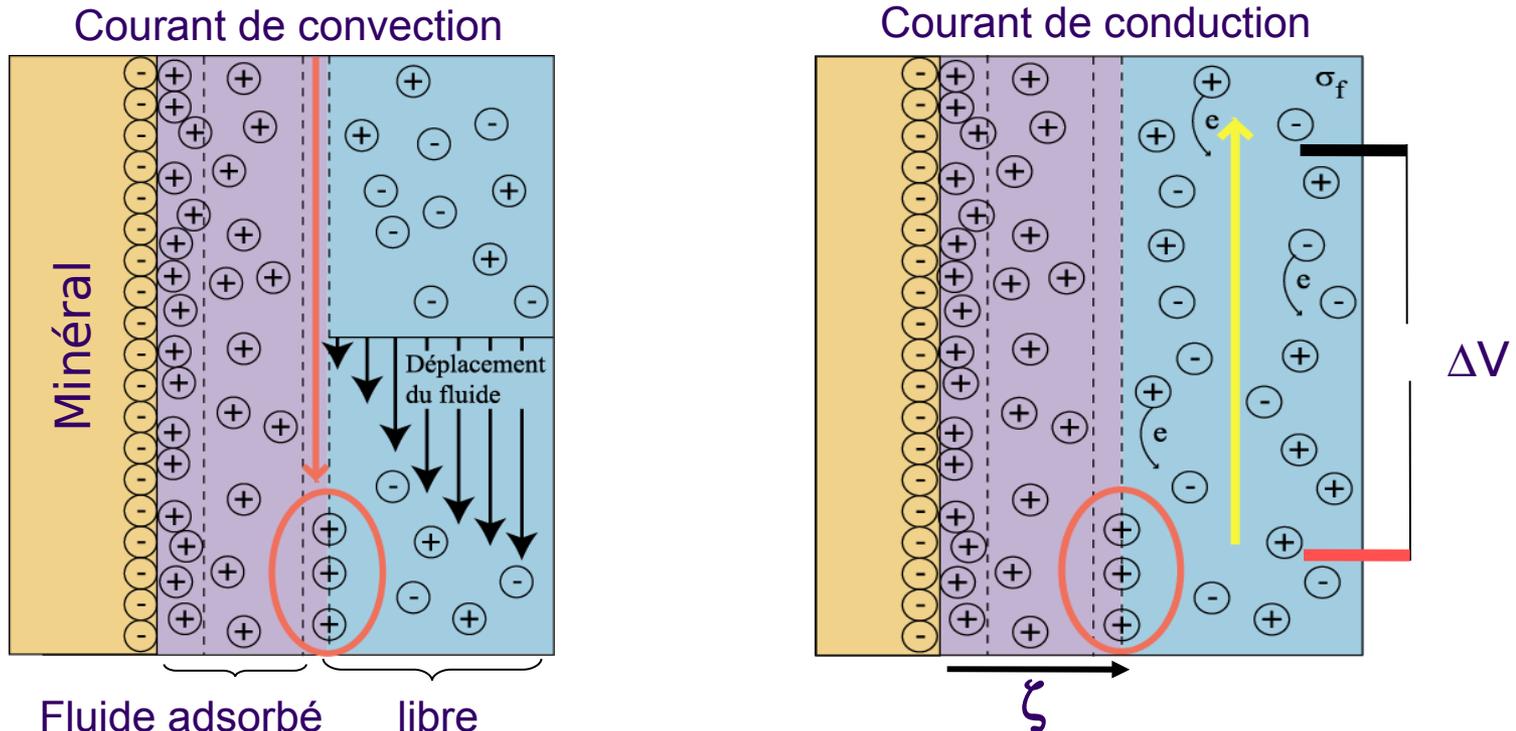
Filtrage Butter et Russel 1993

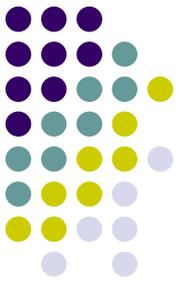


## Origine des phénomènes électrocinétiques:

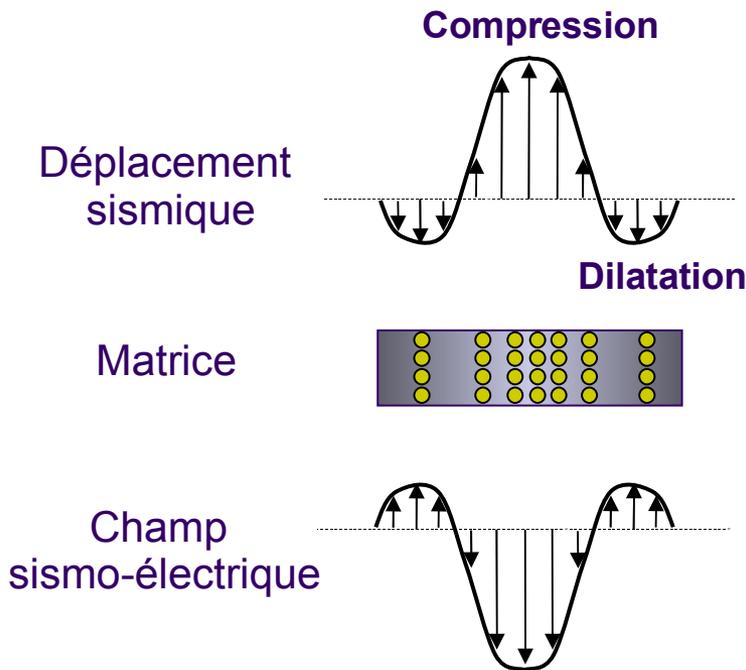
*La double couche électrique (Stern 1924)*

- Minéral généralement chargé négativement en surface: **adsorption des cations**
- Le **mouvement du fluide** induit une **différence de potentiel**





# Les couplages sismo-électromagnétiques



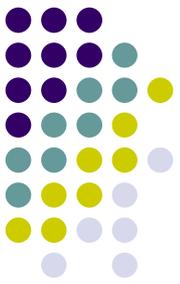
- Effets électrocinétiques à l'échelle des pores générés par le passage d'une onde sismique

- Phénomène transitoire caractéristique des propriétés physico-chimiques du milieu

- Garambois et Dietrich 2001 Milieu homogène infini et approximation basse fréquence:

$$E = \frac{1}{\sigma_f} \frac{\epsilon_0 \rho_f \kappa_f \zeta}{\eta} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_f} \frac{C}{H} \right) \ddot{U}$$

$$|H| = \frac{\phi}{\alpha_\infty} \frac{\epsilon_0 \rho_f \kappa_f |\zeta|}{\eta} \sqrt{\frac{G}{\rho}} |\dot{U}|$$



# Les champs sismo-électromagnétiques

- Déplacements sismiques → Champ sismo-électrique

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U} &= A_{pf} \nabla \Phi_{pf} + A_{ps} \nabla \Phi_{ps} + A_s \nabla \otimes (\Gamma_s \mathbf{i}_\theta) \\
 \mathbf{E} &= \beta_{pf} A_{pf} \nabla \Phi_{pf} + \beta_{ps} A_{ps} \nabla \Phi_{ps} + \beta_s A_s \nabla \otimes (\Gamma_s \mathbf{i}_\theta)
 \end{aligned}$$

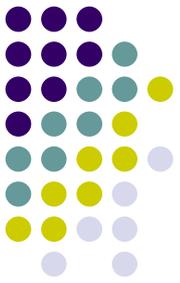
**Purement divergent**  
rot=0
**Purement divergent**  
rot=0
**Purement rotationnel**  
div=0

$\beta_i$  coefficients qui dépendent en particulier:

- de la vitesse de phase de chaque mode
- du coefficient de couplage

- Champ sismo-magnétique: mesures très complexes

$$\mathbf{H} = - \frac{i}{\omega \mu} \nabla \otimes \mathbf{E} \quad \left. \vphantom{\mathbf{H}} \right\} \text{Ondes S (transverses)}$$



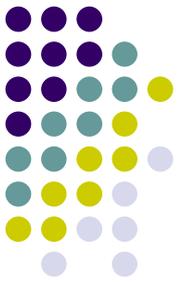
# Théorie des couplages sismo-électromagnétiques

## Caractérisation analytique des CSE:

- Prise en compte de la **théorie de Biot** (1956) pour la propagation sismique en milieu poreux
- Intégration des **équations de Maxwell**
- **Couplages électrocinétiques** en fonction de la fréquence

Théorie la plus aboutie pour la caractérisation des couplages sismo-électromagnétiques: **Pride 1994**

**Hypothèse de base: le milieu est parfaitement saturé**



# Théorie des couplages sismo-électromagnétiques

Pride (1994)

## Caractérisation des effets électrocinétiques:

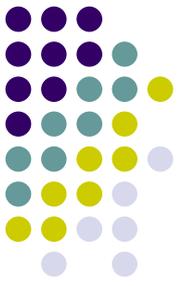
- **Coefficient de couplage** ( $\omega < \omega_c$ ):

$$L_0 = -\frac{\phi}{\alpha_\infty} \frac{\epsilon_r \eta \zeta}{\eta}$$

Factor de formation (Géométrie des pores) →  $\phi$   
 Viscosité du fluide saturant →  $\eta$   
 Permittivité relative du fluide saturant →  $\epsilon_r$   
 Potentiel Zeta du système fluide/roche →  $\zeta$

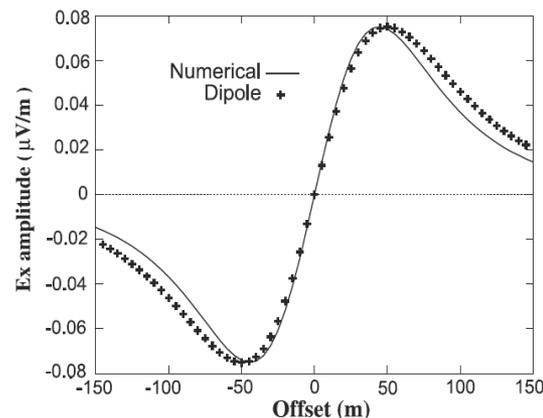
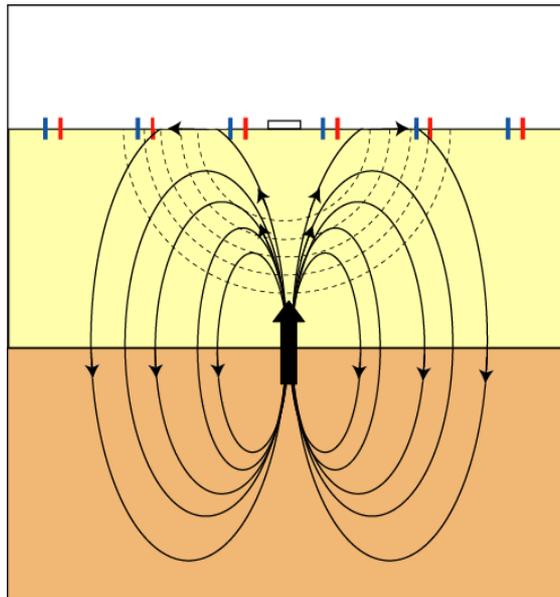
- **Densité de courant résultante**

$$\mathbf{J} = \underbrace{\sigma(\omega) \mathbf{E}}_{\text{Courant de conduction}} - \underbrace{|\mathbf{L}(\omega)| (-\nabla p + i \omega^2 \rho_f \mathbf{U}_s)}_{\text{Courant de convection}}$$

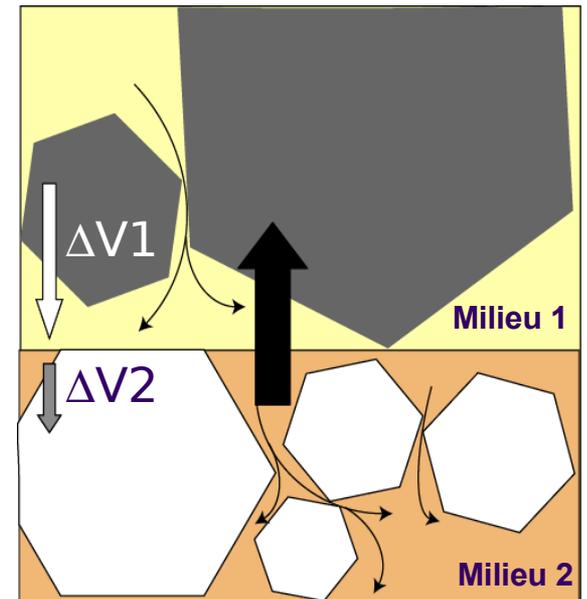


## Applications 1: Conversions électromagnétiques aux interfaces

- Une **discontinuité du sous sol** peut engendrer une discontinuité du champ sismo-électrique: **radiation dipolaire**
- **Atout:** résolution supérieure à la sismique
- **Défaut:** champs très faibles
- **Applications:** détection de poches de gaz, surface de nappes...



Interface à 100m de profondeur  
Garambois et Dietrich 2002





## Applications 2: Mesure du champ cosismique

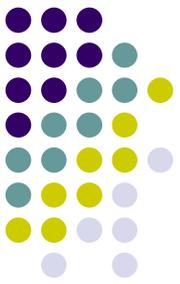
- **Fonction de transfert** entre énergies sismique et sismo-électrique aux fréquences sismiques:

$$E = \frac{1}{\sigma_f} \frac{\varepsilon_0 \rho_f \kappa_f \zeta}{\eta} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_f} \frac{C}{H} \right) \ddot{U}$$

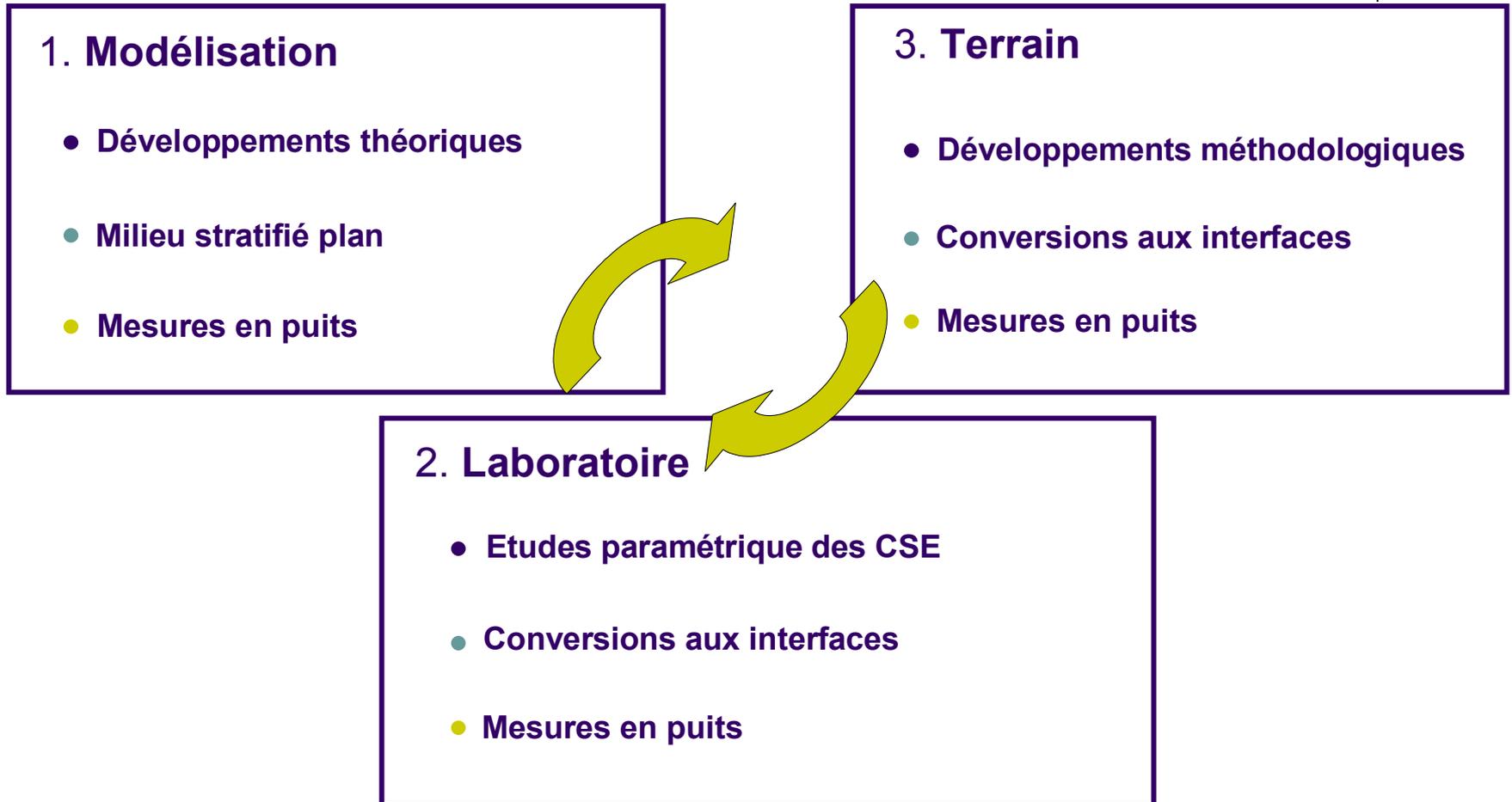
Conductivité du fluide
Viscosité
Potentiel Zeta

(Garambois et Dietrich 2001)

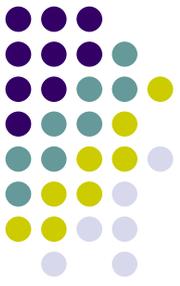
- **Application possible:** méthode géophysique de caractérisation du milieu poreux
- **Atout:** générer des effets électrocinétiques « à la demande »  
→ Monitoring: zones polluées, mesures en puits, réservoirs...



## Etat des connaissances

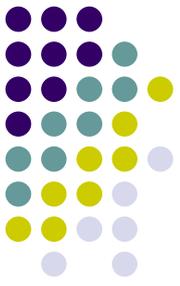


Et finalement... **Des phénomènes encore assez mal compris**



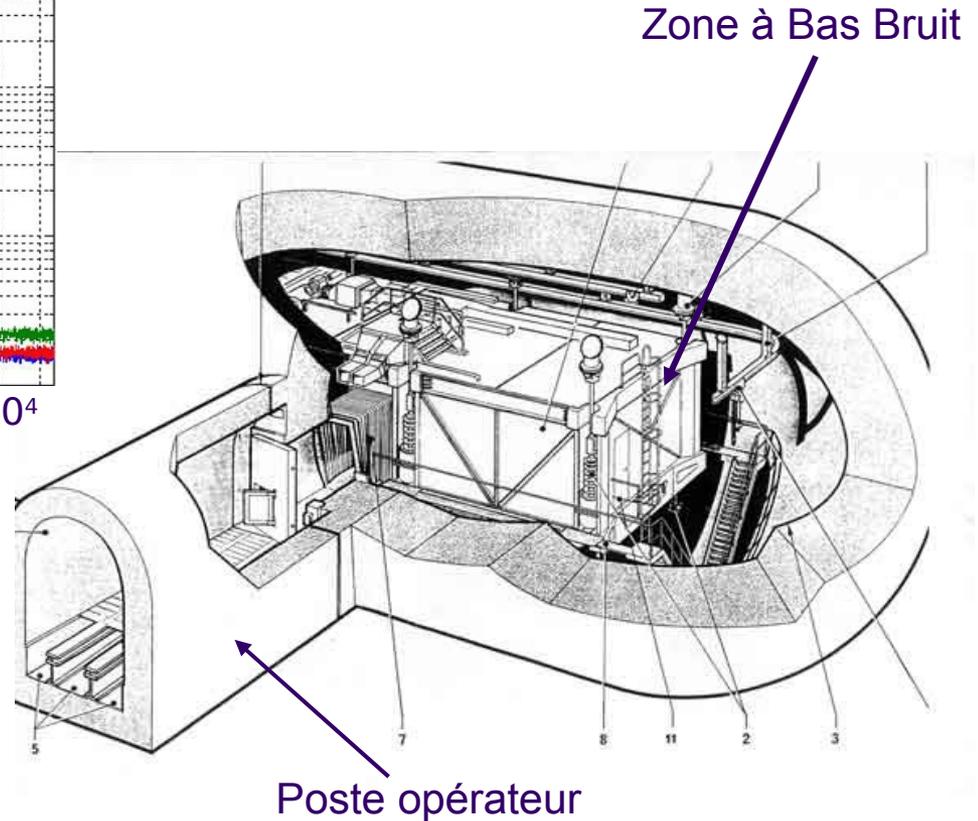
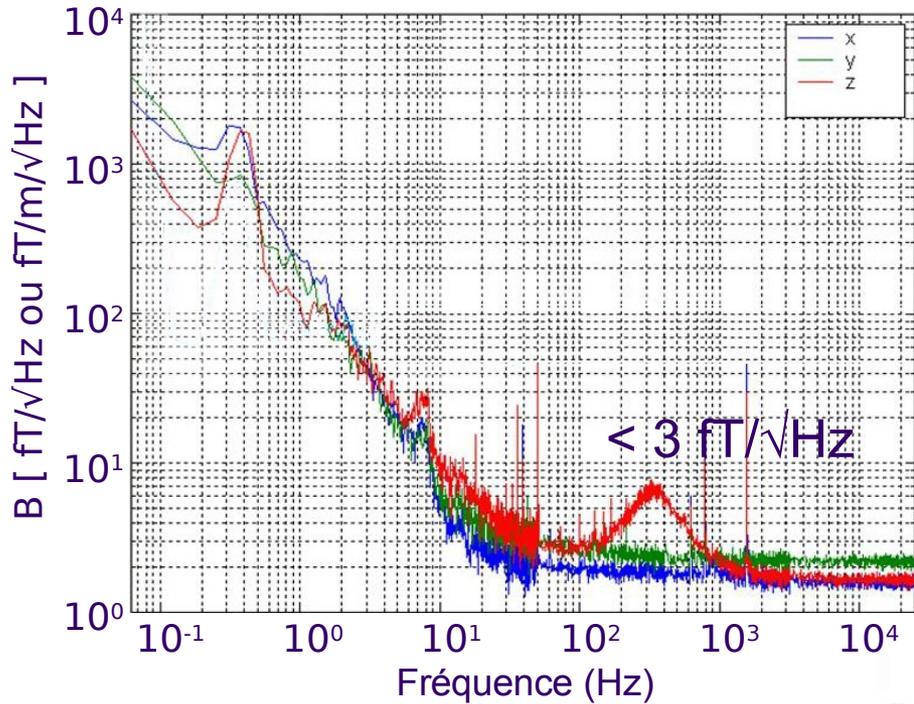
# Une approche expérimentale

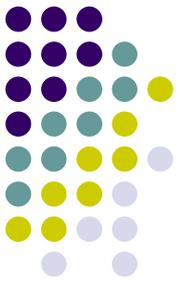
- **Objectif général:** comprendre les modes de conversion entre énergie sismique et électrique
- **Champ sismo-magnétique:** mesurer et quantifier le champ sismo-magnétique
- **Développements instrumentaux:** mesures sismo-électriques et magnétiques
- **Mise en oeuvre:** Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel



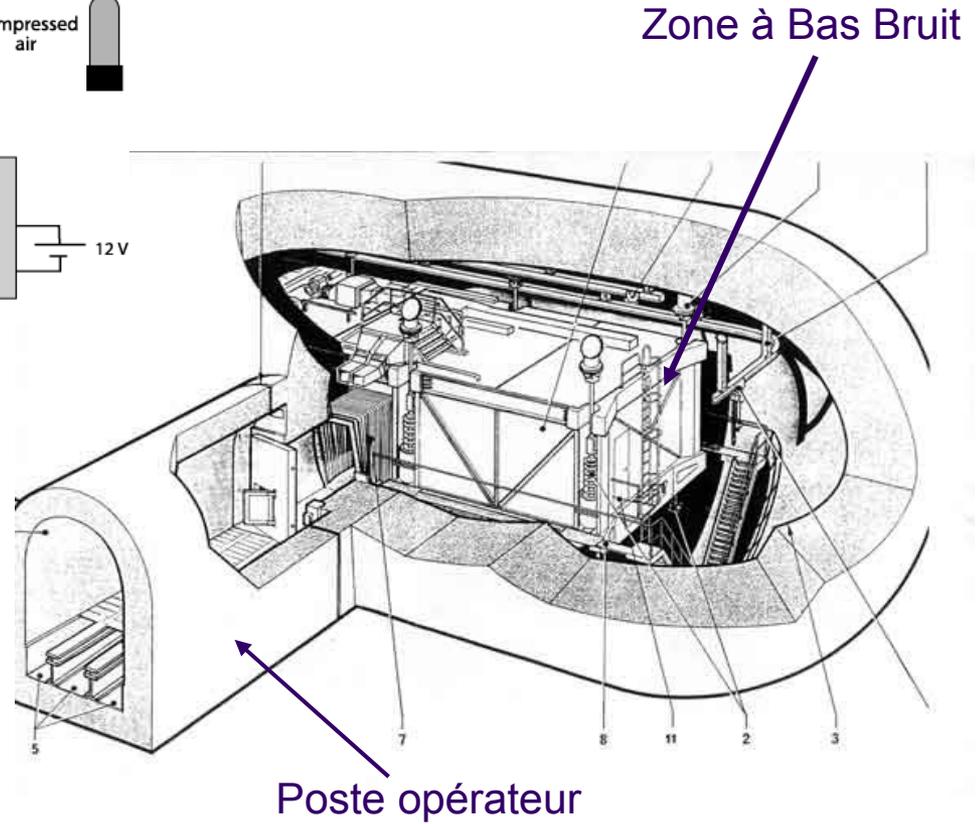
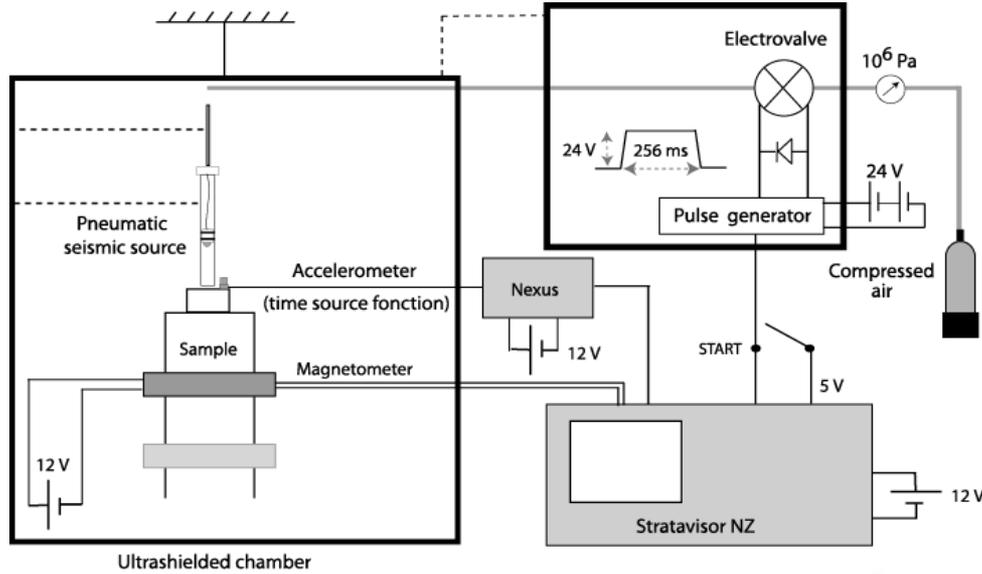
# Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel

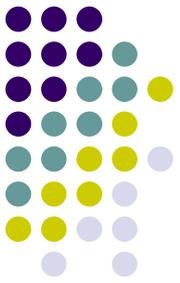
Contenu fréquentiel (bruit magnétique ambiant)



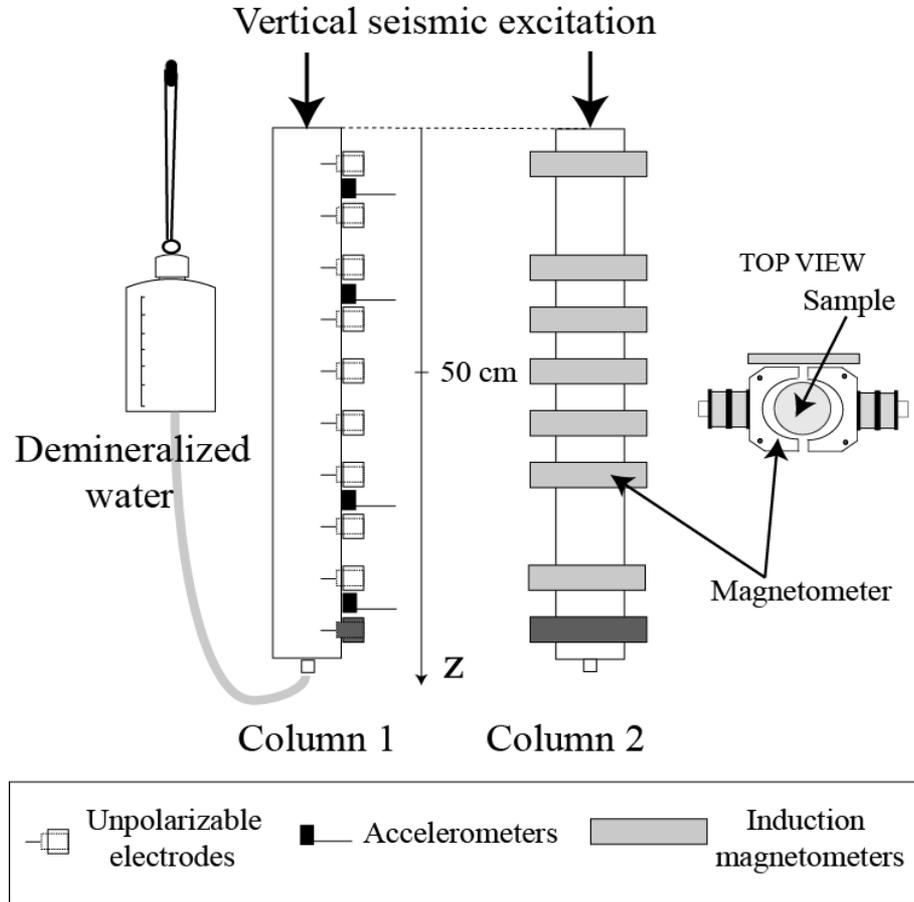


## Mesure du Champ Sismo-Magnétique

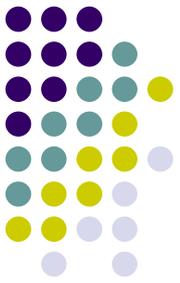




# Mesure du Champ Sismo-Magnétique

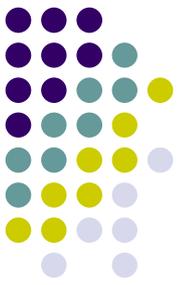


*Bordes et al (2006)*



# Caractéristiques générales de l'expérience

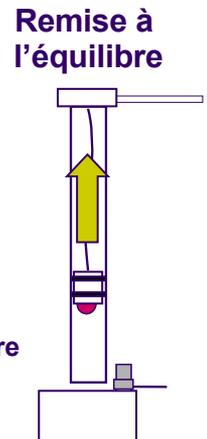
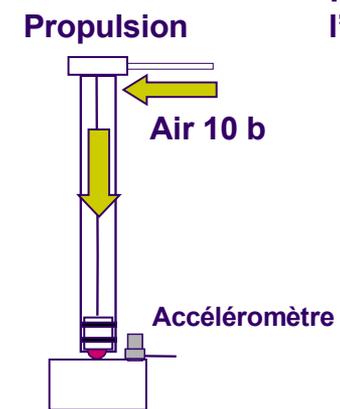
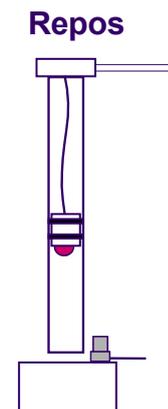
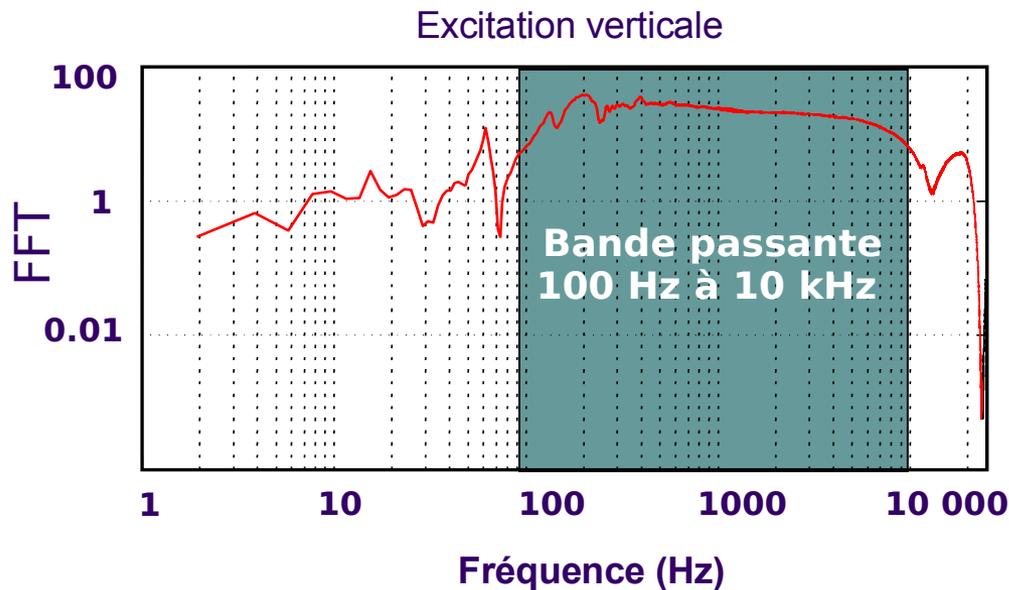
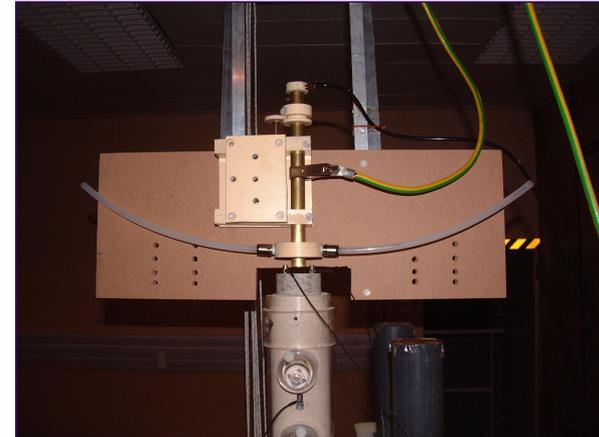
- Caractéristiques mécaniques:
  - **Sable de Fontainebleau** légèrement tassé par vibrations
  - **Echantillon cylindrique**  
de 104 cm de long et de 8 cm de diamètre interne
  - **Perméabilité intrinsèque:**  $5.8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
  - **Porosité:** 30 %
  - **Densité:**  $1.7727 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Caractéristiques électrochimiques:
  - **Conductivité du fluide:** 3.1 mS/m
  - **pH:** 6.55 à 20.5°C
  - **Résistivité:** 22 kΩ.m
- Taux de saturation: **supposé partiel**

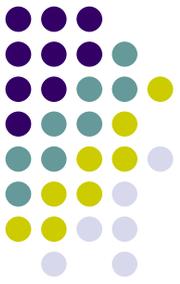


## Source sismique à bas bruit électromagnétique

Nécessité de construire une source sismique:

- Impulsionnelle
- Répétitive
- Pas de perturbations magnétiques





# Prévision des champs sismo-électromagnétiques

## Vitesses

- Propagation sismique: ondes P (rapides et lentes), ondes S, extension

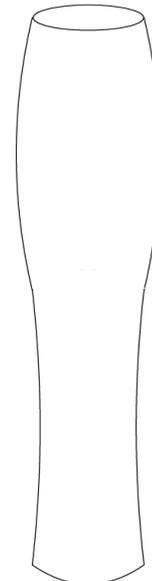
- Calcul des vitesses sismiques en milieu partiellement saturé:

→ Ondes P rapides: 1305 m/s

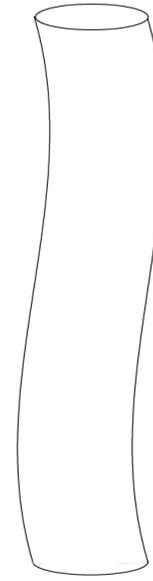
→ Extension: 1290 m/s

→ Ondes S: 868 m/s

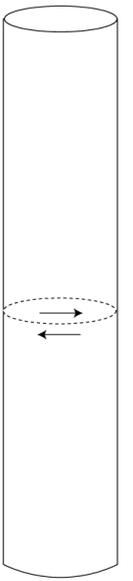
- Pas de différentiation P/extension



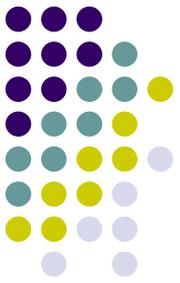
Extension



Flexion



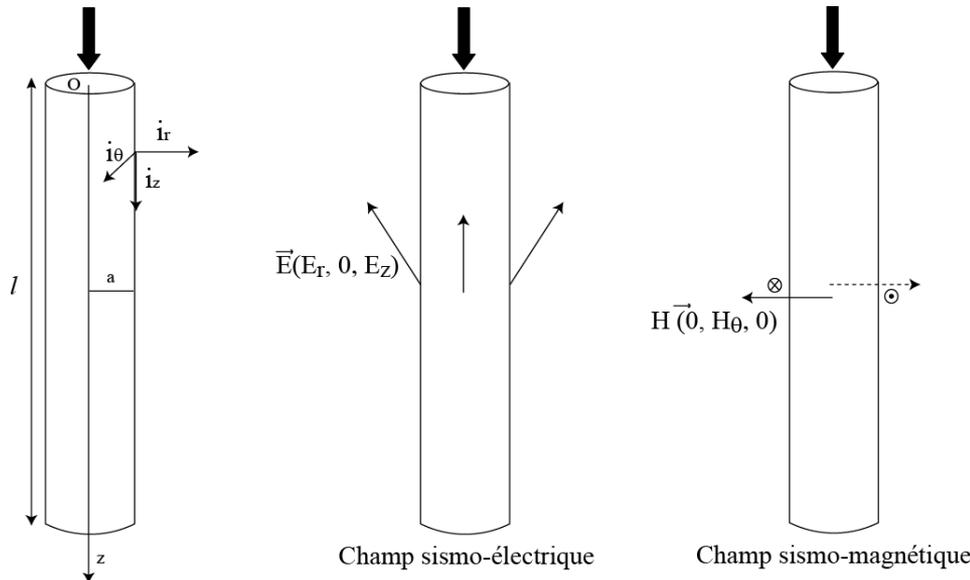
Torsion



# Prévision des champs sismo-électromagnétiques

## Orientation

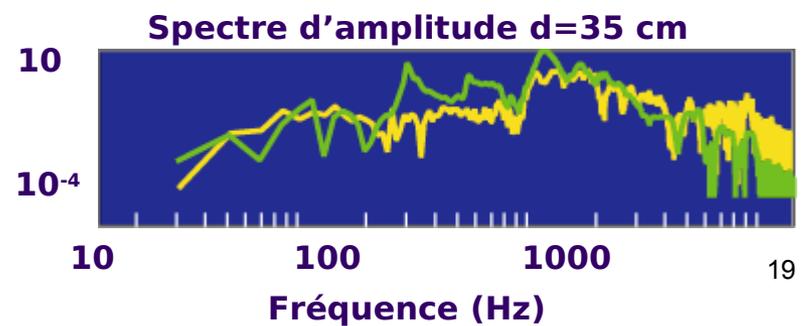
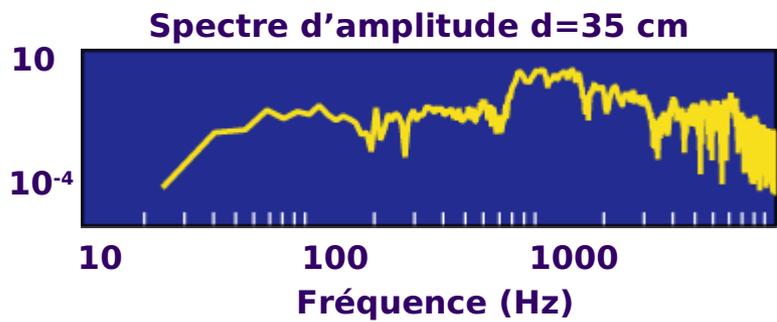
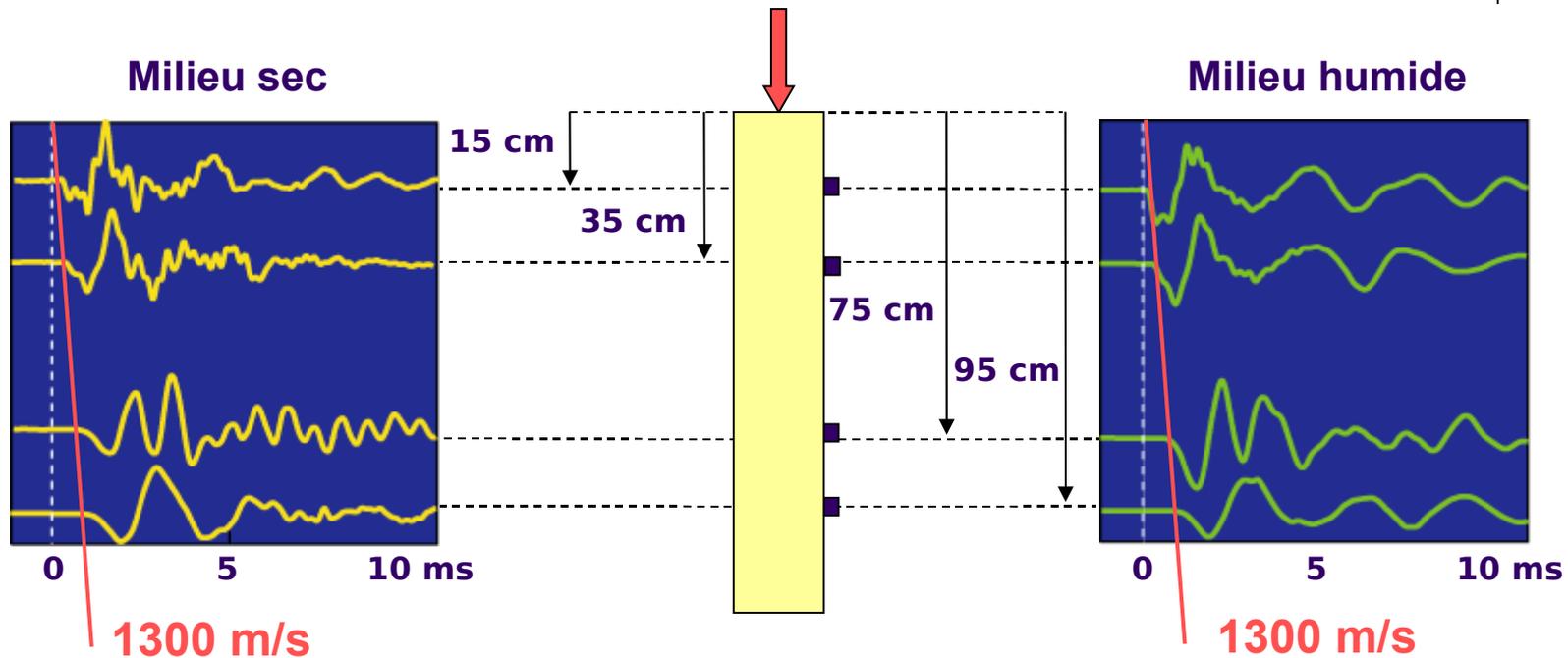
- Hypothèse: source verticale à **symétrie cylindrique**
- Déplacements sismiques:  $U_r$  et  $U_z$  et pas de dépendance en  $\theta$
- Champ sismo-électrique:  $U_r$  et  $U_z$  et pas de dépendance en  $\theta$
- Champ sismo-magnétique:  $U_\theta$  et pas de dépendance en  $\theta$

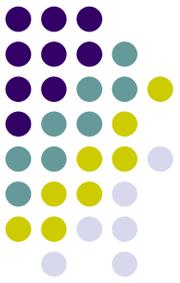


**Tant que la géométrie cylindrique est respectée, le champ sismo-magnétique est toujours tangentiel**

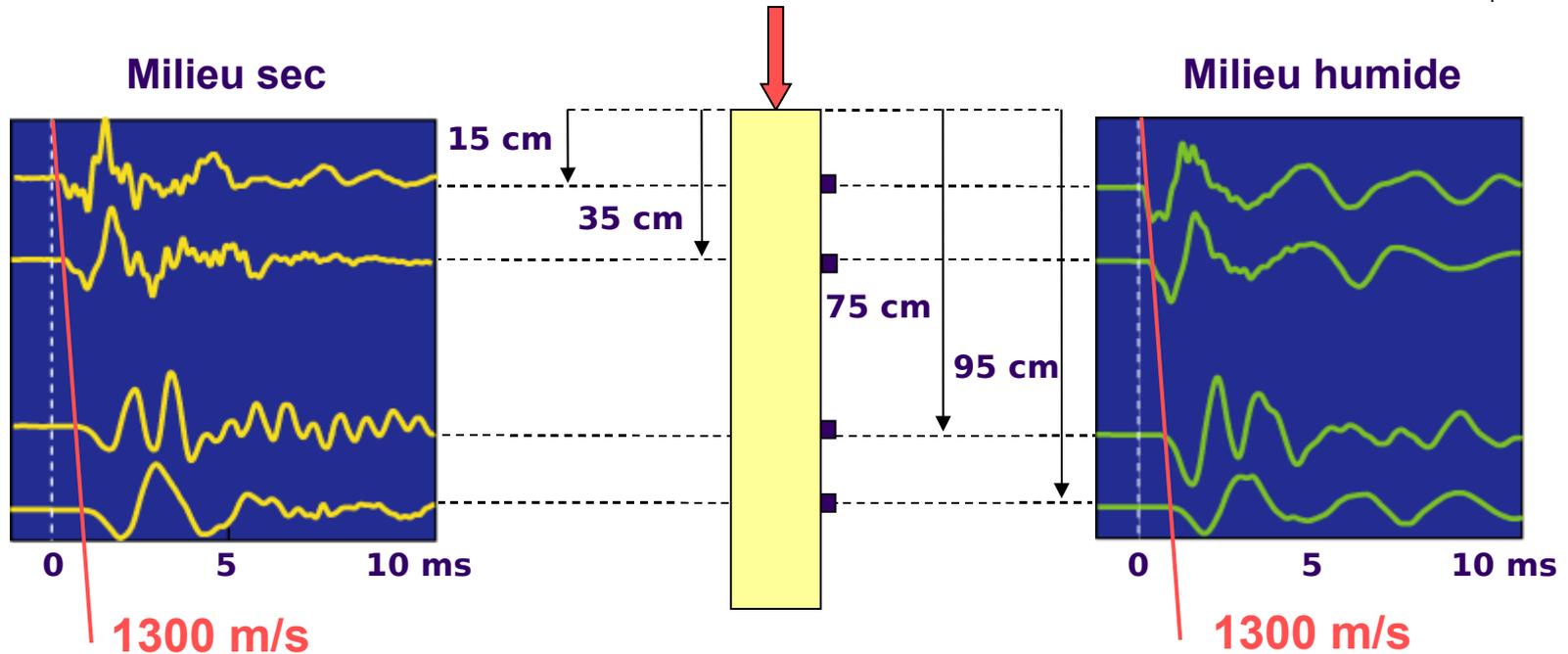


# Réponse sismique





# Réponse sismique

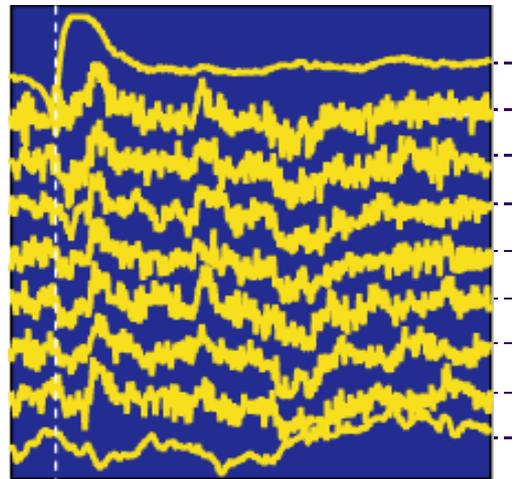


- ➔ La vitesse de propagation de la première arrivée n'est pas modifiée par la présence d'eau: **le taux de saturation est partiel (60 à 80%)**
- ➔ **Contenu fréquentiel** très légèrement plus basse fréquence en milieu humide: effet d'atténuation par l'eau



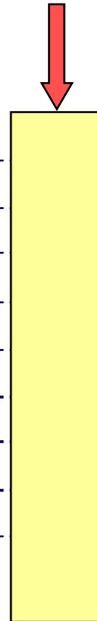
# Réponse sismo-électrique

Milieu sec



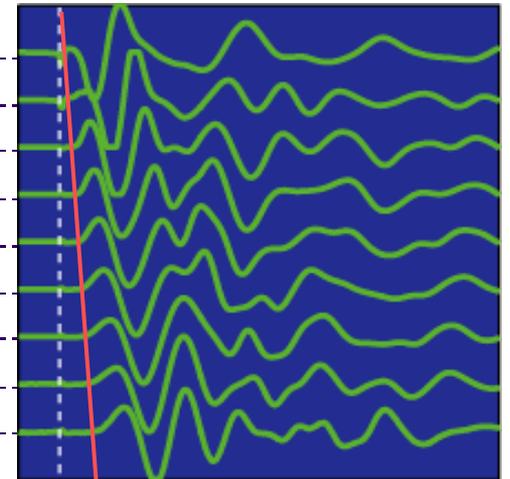
0 5 10 ms

10 cm



Référence

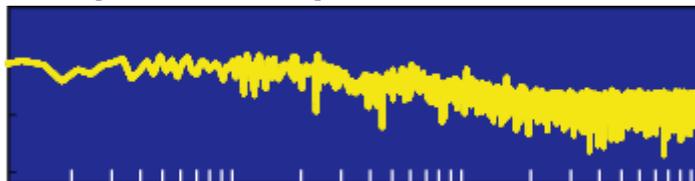
Milieu humide



0 5 10 ms

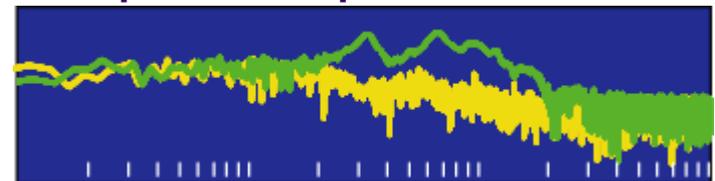
1300 m/s

Spectre d'amplitude d=30 cm



10 100 1000  
Fréquence (Hz)

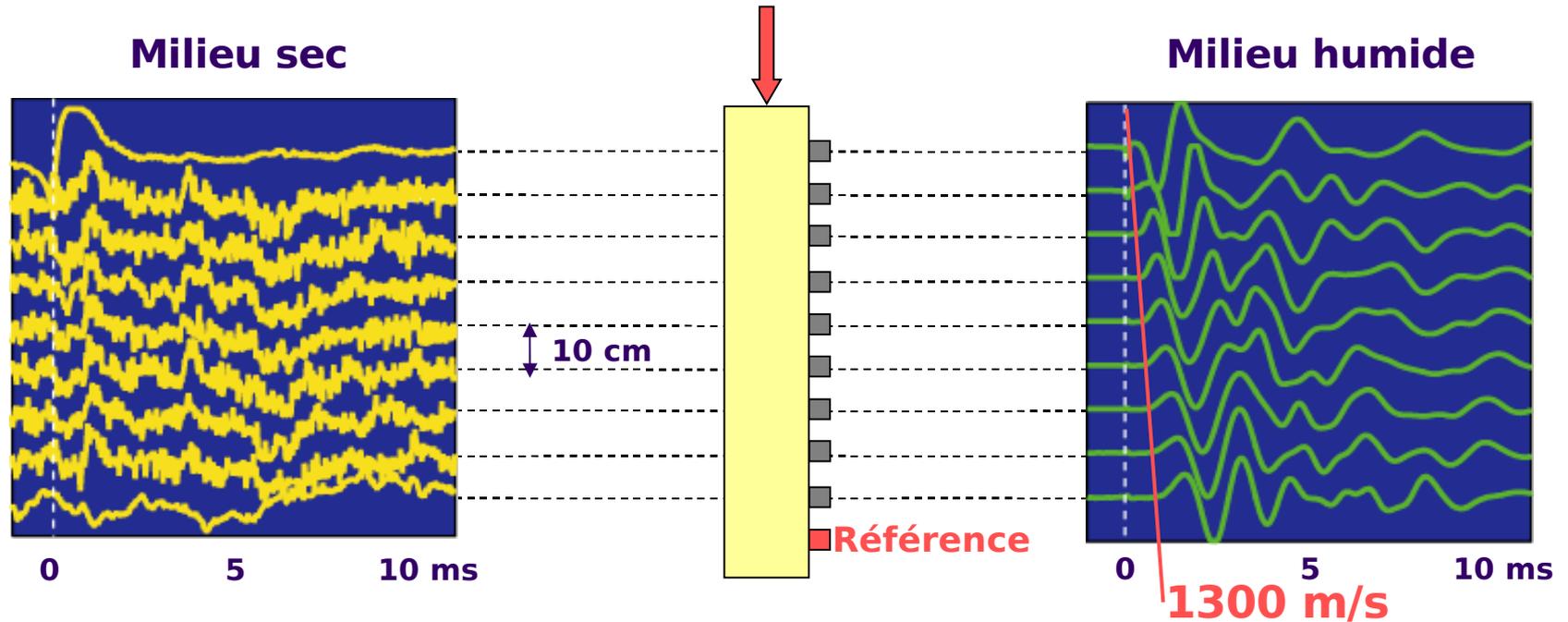
Spectre d'amplitude d=30 cm



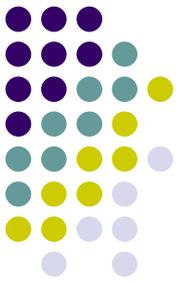
10 100 1000  
Fréquence (Hz)



# Réponse sismo-électrique

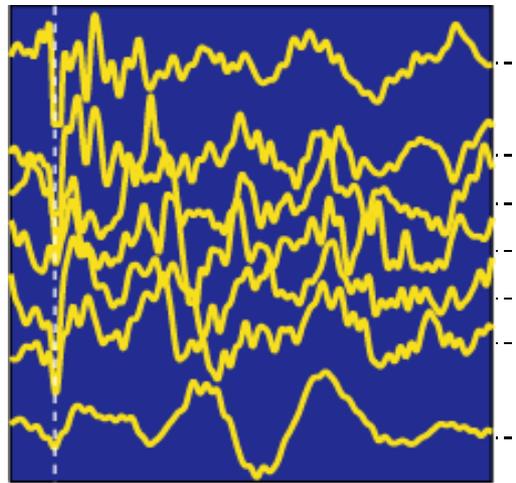


**Pas de signal sismo-électrique dans le sable sec**  
**Signal cohérent en humide et vitesse très proche de la sismique:**  
**l'origine électrocinétique des phénomènes est incontestable**

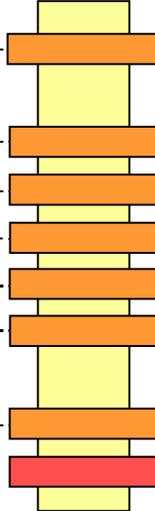


# Réponse sismo-magnétique

Milieu sec



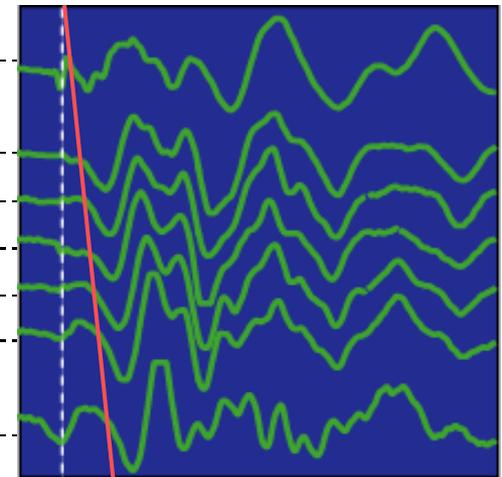
0 5 10 ms



10 cm

Référence

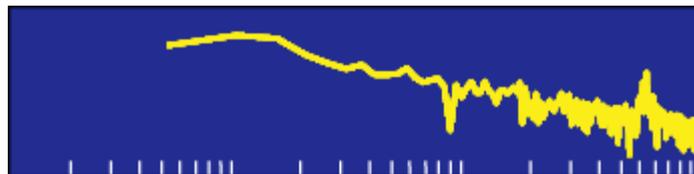
Milieu humide



0 5 10 ms

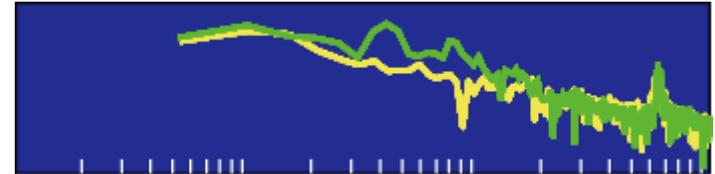
800 m/s

Spectre d'amplitude d=30 cm

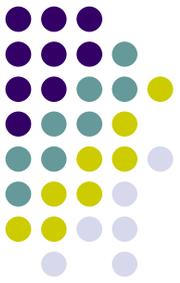


10 100 1000  
Fréquence (Hz)

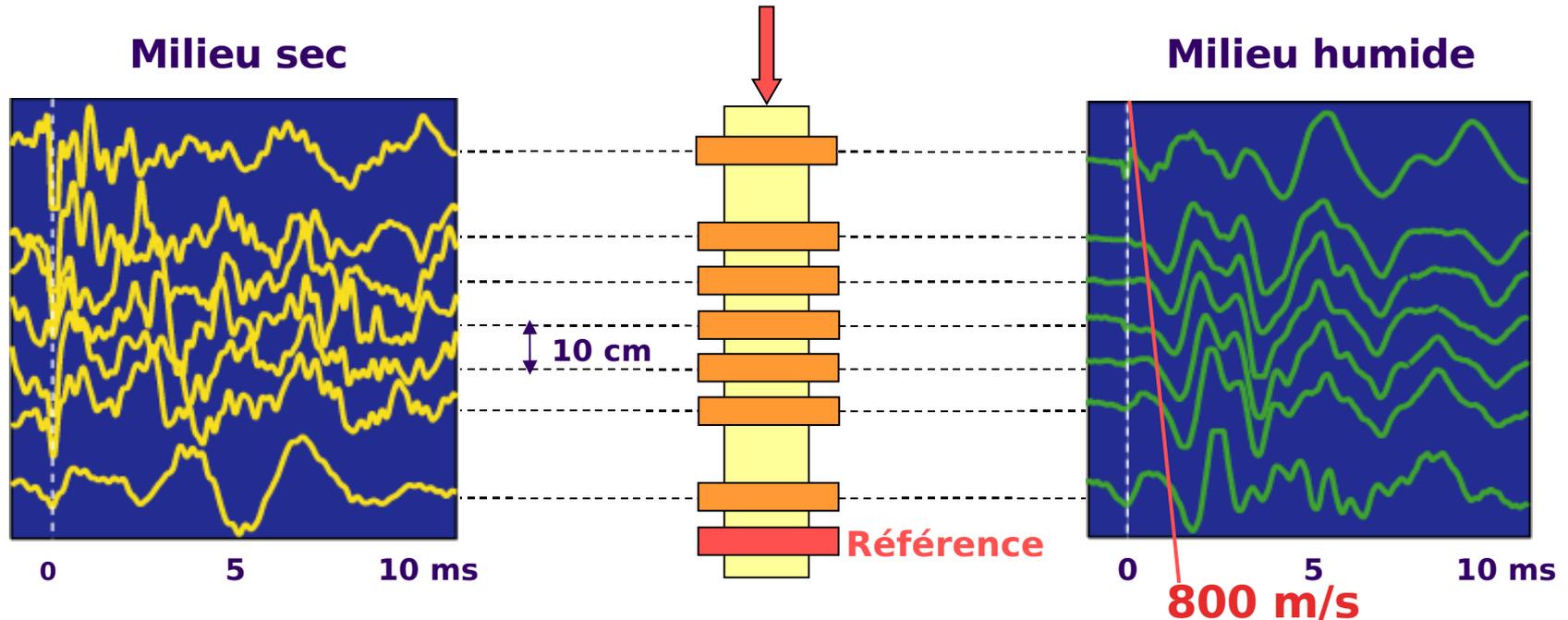
Spectre d'amplitude d=30 cm



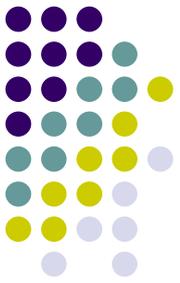
10 100 1000  
Fréquence (Hz)



# Réponse sismo-magnétique



Pas de signal sismo-magnétique dans le sable sec (bruit),  
Signal cohérent en sable humide mais **plus lent** que la sismique  
→ Vitesse incidente compatible avec un couplage aux ondes S  
→ Première **confirmation expérimentale** de la théorie de Pride 1994



# Amplitude sismo-magnétique

- Sensibilité radiale 10 V/nT  
Sensibilité tangentielle 10 mV/nT
- Développements analytiques  
→ le champ magnétique ne peut être que **purement tangentiel**
- **Amplitude maximale** du champ sismo-magnétique: **0.35 nT (source à 0.1g)**  
→ Accélérations en sismique: de 0.05 g (marteau) à 10g (explosifs)

**On ne peut pas exclure complètement la présence d'un champ radial...**  
→ magnétomètre 3 composantes

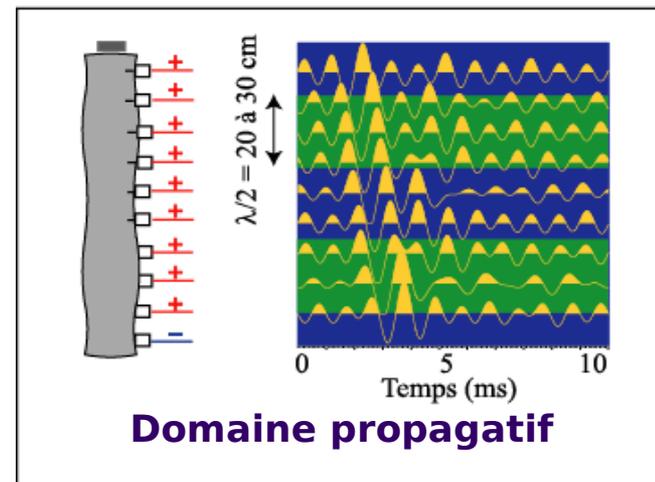
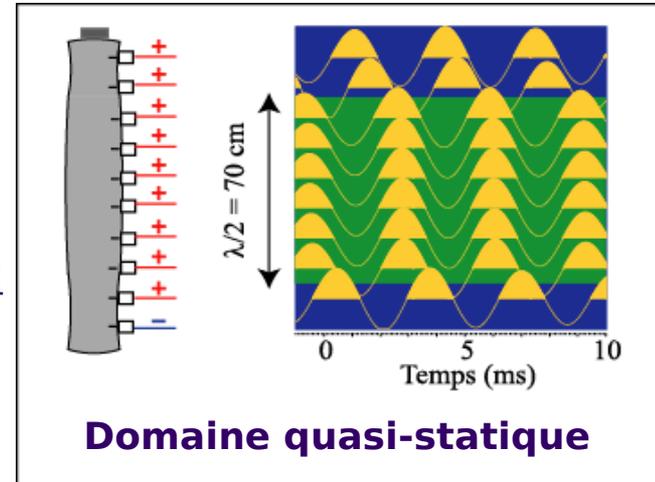


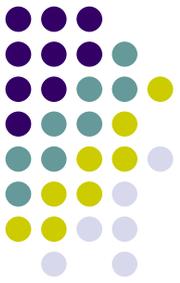
# Forme générale des champs sismo-électromagnétiques

## Décomposition par longueur d'ondes

### Champ sismo-électrique

- Comparaison sismique/électrique:  
Forme d'onde très comparable
- Décomposition par longueurs d'ondes:  
On retrouve l'absence de propagation lorsque  $\rightarrow \lambda < L$
- Domaine quasi statique (BF):  
150 à 500 Hz  $\rightarrow \lambda_i > 1\text{m}$
- Domaine quasi statique (BF):  
500 à 2000 Hz  $\rightarrow \lambda < 1\text{m}$



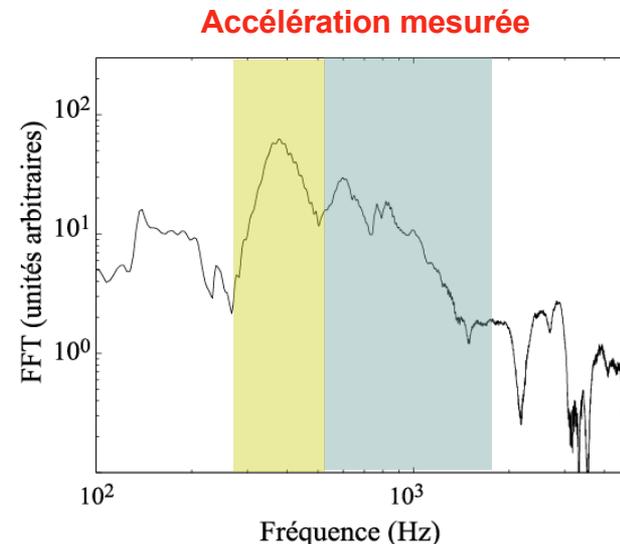
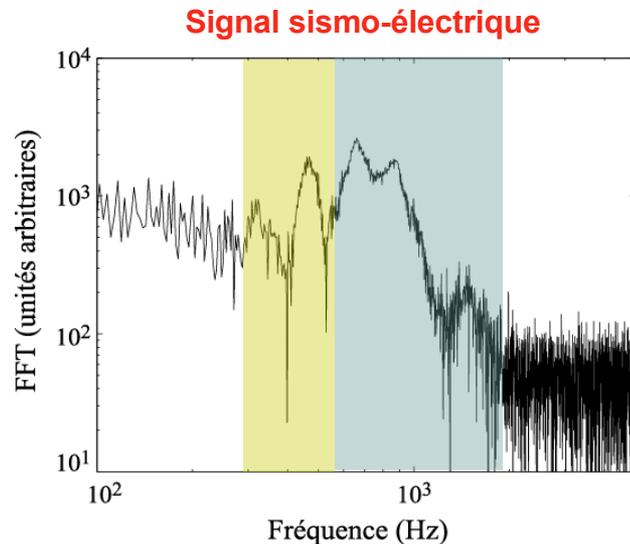


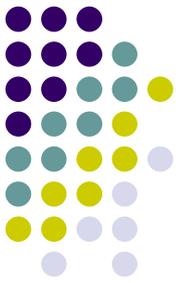
# Forme générale des champs sismo-électromagnétiques

## *Contenu fréquentiel*

- Domaines quasi-statique et propagatif observables dans le spectre
- Comparaison sismique/électrique:  
Spectres comparables

→ les caractéristiques acoustiques se retrouvent dans la mesure sismo-électrique

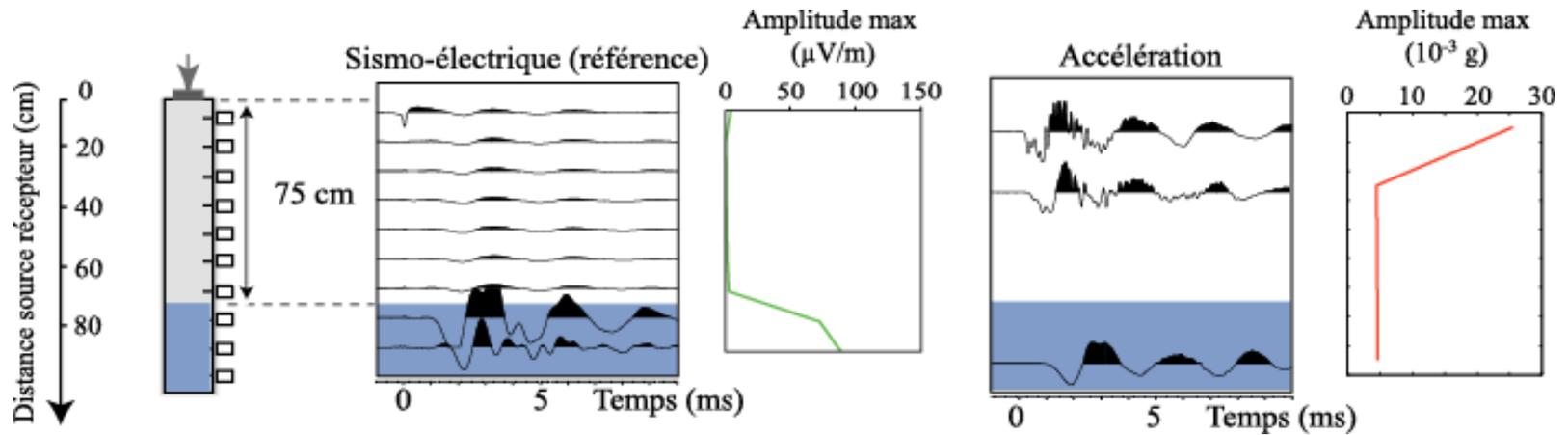




## Role de l'état de saturation

*Activation de la source au cours de la mise à saturation*

- Enregistrement sismo-électrique pour différents états de saturation

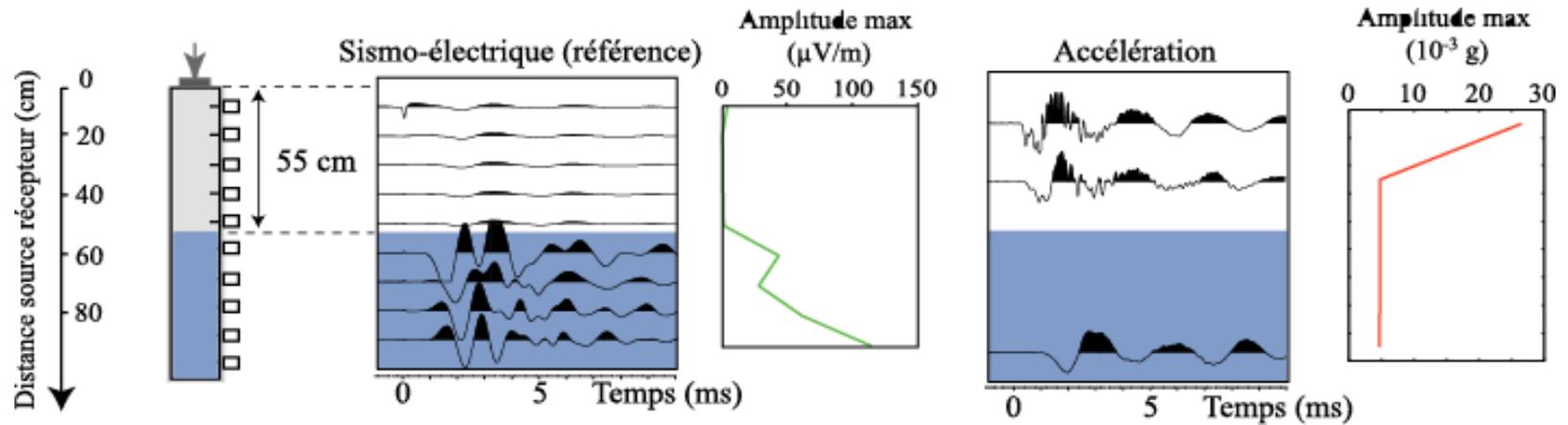




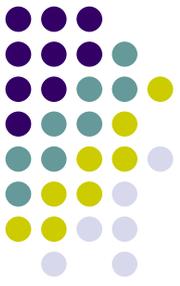
## Role de l'état de saturation

*Activation de la source au cours de la mise à saturation*

- Enregistrement sismo-électrique pour différents états de saturation



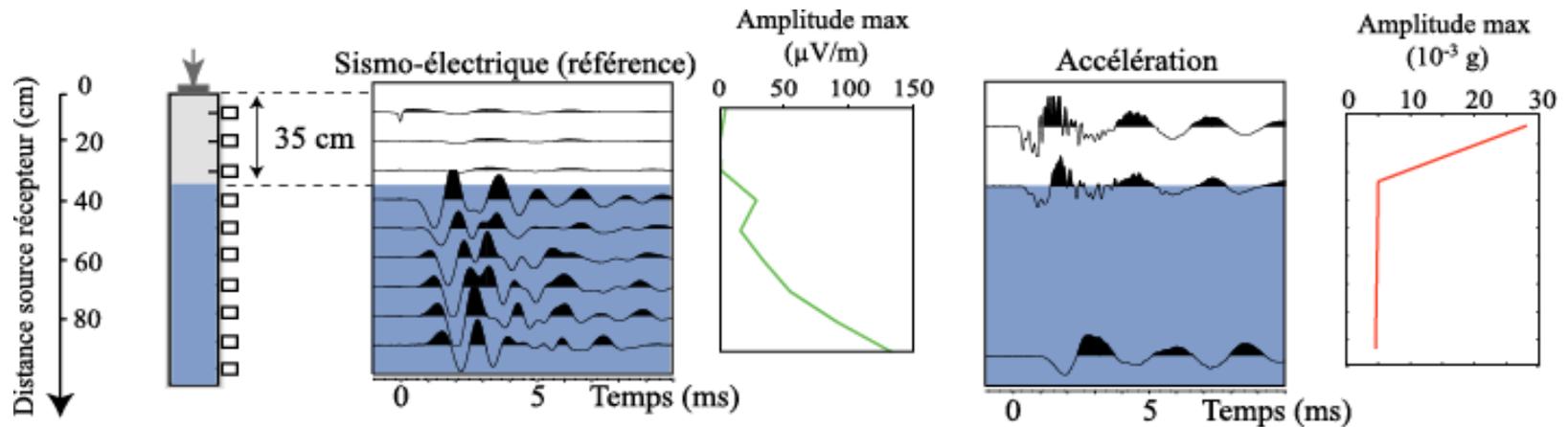
- Apparition de l'effet sismo-électrique à la mise en eau



## Role de l'état de saturation

*Activation de la source au cours de la mise à saturation*

- Enregistrement sismo-électrique pour différents états de saturation



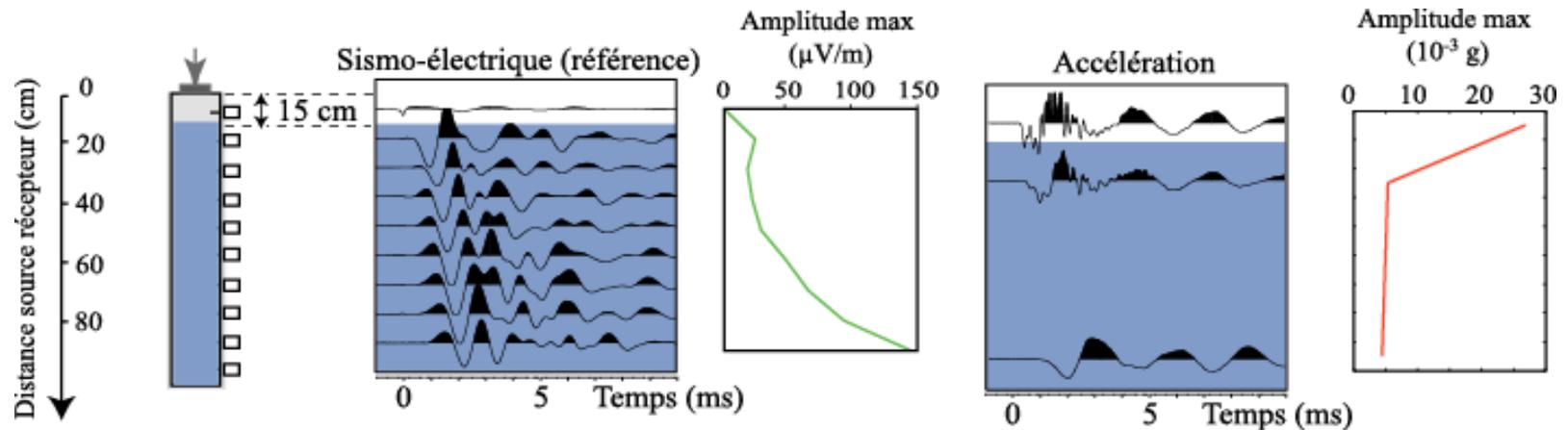
- Apparition de l'effet sismo-électrique à la mise en eau
- Anomalie d'amplitude observée au front de saturation



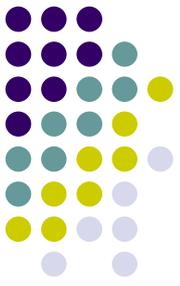
## Role de l'état de saturation

*Activation de la source au cours de la mise à saturation*

- Enregistrement sismo-électrique pour différents états de saturation



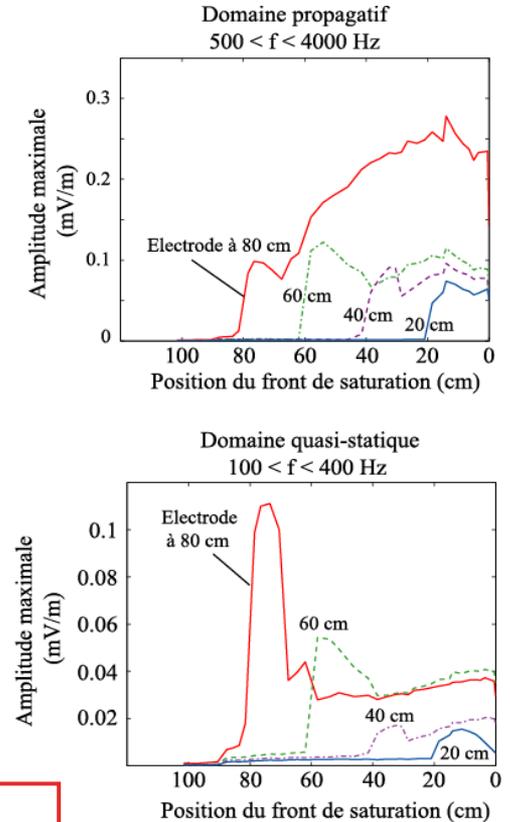
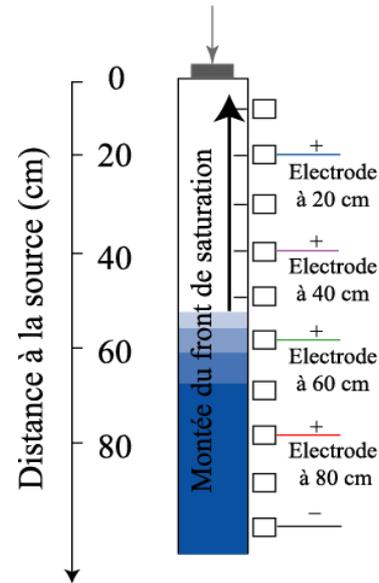
- Apparition de l'effet sismo-électrique à la mise en eau
- Anomalie d'amplitude observée au front de saturation



## Role de l'état de saturation

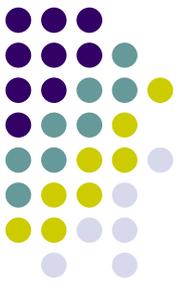
*Activation de la source au cours de la mise à saturation*

- **Amplitude maximale** du champ sismo-électrique lors de la montée du front de saturation
- Comportements différents dans les domaines QS et propagatif
- Anomalie (pic) d'amplitude dans la **frange capillaire** et surtout à basse fréquence



### Interprétation ?

- Nouveaux développements théoriques nécessaires
- Expériences de quantification



# Conclusions

- **Couplages Sismo-électromagnétiques** = phénomènes électrocinétiques conditionnés par la **présence d'eau dans les pores**
- **Avantages de la méthode:**
  - **Méthode active**
  - Mesures en puits
  - Imagerie très haute résolution (> sismique)
- **Mesure:** champ **sismo-électrique** (aisé, mV)  
**sismo-magnétique** (possible mais délicat, 0.1 nT)
- **Développements théoriques:** fluides polyphasiques
  - Comportement électrochimique (potentiel  $\zeta$ )
  - Comportement mécanique (propagation)